

7-31-2020

Performance Analysis of Netted Radar Data Fusion Systems

Zhijie Chen

1. Information Center of Exercitation Department, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; ;

Bin Rao

2. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; ;3. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Changsha 410073, China;

Yongzhen Li

2. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; ;3. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Changsha 410073, China;

Zhiwei Zong

2. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; ;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Performance Analysis of Netted Radar Data Fusion Systems

Abstract

Abstract: The performance analysis of netted radar data fusion systems was proposed. *The principles of two representative radar netting modes (i.e., centralized fusion and distributed fusion) were introduced and the associated capabilities of anti-jamming, anti-stealth, fusion accuracy, fusion discrimination, and communication requirements were quantitatively analyzed. Simulation results indicate that the netting essence is, centralized fusion by using 'or' rule to complement information and realize trajectory composition whereas distributed fusion by using 'and' rule to reduce information redundancy and realize discrimination ability.* The research can provide some enlightenment for the newly-developed intellectual netted radar data fusion systems.

Keywords

radar netting, data fusion, centralized fusion, distributed fusion, performance analysis, system simulation

Recommended Citation

Chen Zhijie, Rao Bin, Li Yongzhen, Zong Zhiwei. Performance Analysis of Netted Radar Data Fusion Systems[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(7): 1526-1531.

雷达组网数据融合系统性能分析

陈志杰¹, 饶彬^{2,3}, 李永祯^{2,3}, 宗志伟²

(1. 国防科技大学训练部信息中心, 长沙 410073; 2. 国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙 410073;
3. 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 长沙 410073)

摘要: 针对雷达组网数据融合系统, 对其系统性能进行了详细分析。介绍了 2 种典型雷达组网模式 (集中式融合和分布式融合) 的工作原理, 对其抗干扰、反隐身、融合精度、融合识别和通信量等方面的性能进行了定量研究。研究表明, 集中式雷达组网的实质是多雷达探测信息的“并”, 利用信息互补, 具备航迹合成功效; 分布式雷达组网的实质是多雷达探测信息的“交”, 利用信息冗余, 具备电假目标航迹鉴别功效。研究结果可为新一代智能雷达组网数据融合系统的建设提供一定的参考意义。

关键词: 雷达组网; 数据融合; 集中式融合; 分布式融合; 性能分析; 系统仿真

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 07-1526-06

Performance Analysis of Netted Radar Data Fusion Systems

Chen Zhijie¹, Rao Bin^{2,3}, Li Yongzhen^{2,3}, Zong Zhiwei²

(1. Information Center of Exercitation Department, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Changsha 410073, China)

Abstract: The performance analysis of netted radar data fusion systems was proposed. The principles of two representative radar netting modes (i.e., centralized fusion and distributed fusion) were introduced and the associated capabilities of anti-jamming, anti-stealth, fusion accuracy, fusion discrimination, and communication requirements were quantitatively analyzed. Simulation results indicate that the netting essence is, centralized fusion by using ‘or’ rule to complement information and realize trajectory composition whereas distributed fusion by using ‘and’ rule to reduce information redundancy and realize discrimination ability. The research can provide some enlightenment for the newly-developed intellectual netted radar data fusion systems.

Keywords: radar netting; data fusion; centralized fusion; distributed fusion; performance analysis; system simulation

引言

随着综合电子干扰技术的发展, 单部雷达已经很难与电子对抗系统全面抗衡, 新的威胁促使雷达

向网络化方向发展。组网雷达充分利用单部雷达资源和信息融合优势, 把多部不同体制、不同频段、不同工作模式、不同极化方式的雷达进行优化布站, 借助于通信手段联网, 由中心站统一调配, 从而使得在探测、定位、跟踪、识别、抗干扰、反隐身等方面的雷达整体性能得以大幅度改善^[1]。

雷达组网系统在当今防空反导和空间监视系统中都扮演着重要角色。例如, 俄罗斯部署在莫斯科周围的“橡皮套鞋”反导系统是典型的单基地雷



收稿日期: 2014-06-15 修回日期: 2014-12-11;
基金项目: 国家自然科学基金(61201335; 61101180);
作者简介: 陈志杰(1965-), 女, 辽宁绥中人, 高工,
研究方向为网络与信息系统; 饶彬(1980-), 男, 四川
彭州人, 讲师, 研究方向为跟踪与数据融合、电子信
息系统建模与评估; 李永祯(1977-), 男, 内蒙古化德
人, 副教授, 研究方向为极化信息处理。

<http://www.china-simulation.com>

• 1526 •

达组网的例子;“爱国者”导弹系统是台湾防空、反导系统中的重要组成部分;美国的 MD 导弹防御系统也是典型的多层次雷达组网系统^[2]。

已有大量文献对雷达组网的各方面进行了研究^[3-6], 这些文献多关注于具体技术细节, 对组网融合系统的性能分析及其仿真实现关注不多。本文围绕雷达组网系统性能分析和系统仿真实现技术进行了一些初步探索, 拟希望为新一代智能雷达组网数据融合系统的建设提供一定的参考建议。

1 雷达组网模式

归纳常见的雷达组网融合方法, 主要有以下几种: 集中式、分布式、混合式、多级式、双/多基地、引导交接班等^[7-8]。雷达组网模式种类较多, 需要具体问题具体分析。每种模式下又有一些改进或变种, 例如集中式和分布式可同时处理构成混合式融合。由于篇幅有限, 本文仅选取集中式和分布

式模式进行性能分析和仿真系统设计。

集中式组网融合系统中, 分雷达系统一般只进行搜索处理, 将原始探测点迹信息上传至融合中心, 在融合中心集中进行数据对准、点迹关联、航迹预测和航迹滤波并形成统一航迹。因此, 除数据对准外, 融合中心的处理流程和单部雷达的数据处理流程基本一致。

分布式组网融合系统中, 分雷达系统首先独立完成多目标跟踪与状态估计, 将目标航迹信息传至融合中心, 在融合中心完成数据对准、航迹关联、航迹融合、剔除虚假航迹并形成全局航迹。由于分雷达是完整的雷达系统, 因此分布式组网融合结构可以以较低的费用获得较高的可靠性和可用性。

表 1 归纳了集中式和分布式雷达组网的特点, 包括工作原理、拓扑结构、通信内容、优缺点和适用条件等。

表 1 集中式和分布式雷达组网的特点

特点	组网类型	
	集中式组网	分布式组网
工作原理	分雷达只进行搜索处理, 原始点迹全部上传融合中心, 融合中心进行数据对准、点迹关联、航迹预测和航迹滤波并形成全局航迹。	分雷达是完整的雷达系统, 产生局部航迹并上传融合中心; 融合中心进行航迹关联和航迹融合, 剔除虚假航迹并形成全局航迹。
拓扑结构	星状结构。一个全局处理中心, 多个数据节点。	树状结构, 一个全局处理中心, 多个局部处理中心, 多个数据节点。
通信内容	原始探测点迹: 时间、SNR、距离、方位、俯仰、径向速度、极化、雷达位置等, 一般需要反馈。	原始探测航迹: 时间、局部航迹号、SNR、滤波位置、滤波速度、滤波误差、雷达位置等, 一般不需要反馈。
优点	目标信息损失最小; 数据率更高; 具备航迹合成功效; 适用于微弱目标的探测。	系统实现简单; 通信量较少; 融合中心具备假目标航迹鉴别能力; 具备独立跟踪能力, 系统生存能力强。
缺点	融合中心处理负担重; 通信量较大; 一般需要反馈, 系统生存能力较差。	不是理论最佳融合方法; 隐身目标探测能力弱些。
适用条件	一般适用于同平台或距离较近的雷达系统进行数据融合。纯集中式模式已较少采用, 一般采用实用的集中式模式, 即分雷达仍维持跟踪 ^[8] 。	一般适用于欺骗干扰场景和多目标跟踪场景。雷达一般是相近体制雷达, 探测精度相当。

2 雷达组网系统性能分析

2.1 抗干扰能力分析

根据文献[1], 组网雷达抗有源压制干扰能力主要体现在体制多样性、频段多样性、空间分散性、功率合成和信息融合等方面; 组网雷达抗有源欺骗

干扰能力则主要体现在系统隐蔽性、信号密集性、信号多样性、频段多样性和系统辨别力等方面。这里重点分析其在抗多假目标欺骗干扰方面的功效。

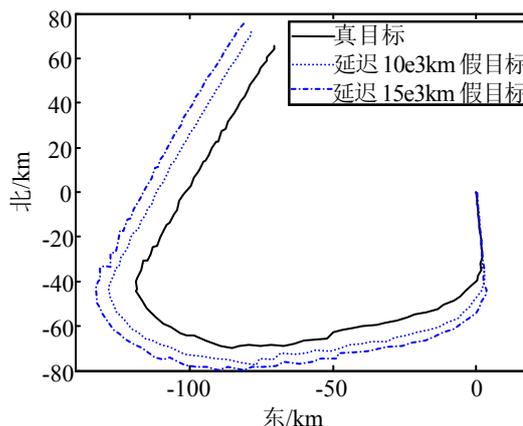
基于数字射频存储器(DRFM)技术^[9]的先进转发式干扰机可以产生和真目标高度逼近的欺骗信号。假目标可以非常有效地将干扰能量集中到雷达

接收带宽内；共享雷达的脉冲压缩处理增益；并能同时产生多个假目标。这些假目标可以轻松骗过雷达的信号处理器，进入雷达数据处理系统，形成大量虚假航迹，不仅消耗雷达跟踪资源，而且使得雷达无法鉴别真假。一种比较有效的方法即是采用雷达组网数据融合进行鉴别，一方面由于空间和频率分集，干扰机很难对多部雷达同时产生假目标航迹；另一方面，即使对多部雷达产生了假目标航迹，融合中心也可以利用同源检测原理进行鉴别^[3]。

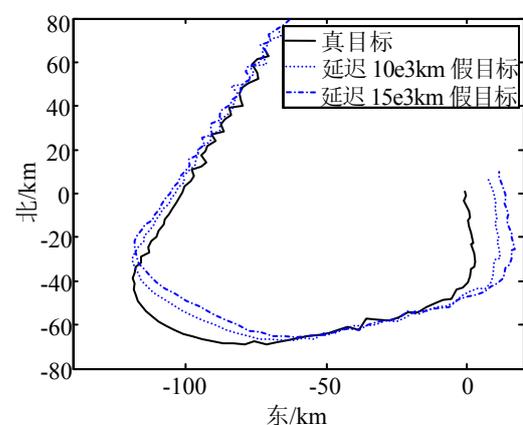
同源检测的基本思想是：基于 DRFM 的转发式干扰机产生的假目标主要为距离多假目标，同一时刻，不同雷达观测到的电假目标其空间位置不同（处于雷达视线延长线上），而实体目标（包括干扰机实体）的位置是相同的。真目标出于同源，其航迹正确关联，仅受观测噪声影响；假目标并非同源，航迹无法关联或者关联度量值偏大，利用关联门限即可很好地剔除假目标航迹。

图 1 给出了一个具体仿真示例。考虑机载自卫突防场景，一架飞机携带自卫式干扰机，用两部跟踪雷达同时进行探测。干扰机为一部转发式干扰机，波束较宽，采用多通道处理，可对侦测波束范围内的两部雷达系统同时进行转发式距离欺骗干扰。两部雷达在局部北天东直角坐标系独立进行跟踪，由为了方便起见，暂不考虑虚警和杂波。局部航迹上传至融合中心，在地心坐标系(ECF)统一进行航迹关联和航迹融合。

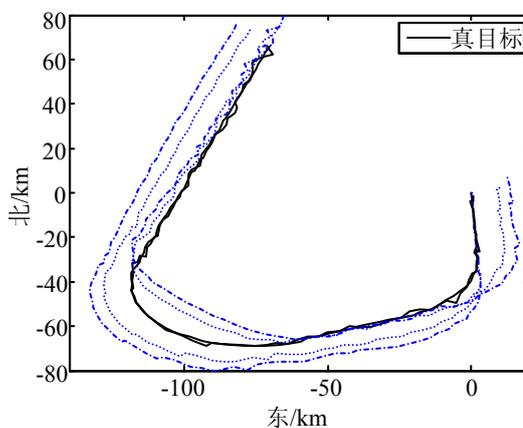
假设干扰机对雷达 1 和雷达 2 均产生延迟 10 km 和 15 km 的 2 个假目标，这样雷达 1 产生 3 条航迹，即真目标(R1)、 $\Delta R=10$ km(R1)和 $\Delta R=15$ km(R1)，见图 1 (a)。雷达 2 产生了 3 条航迹，真目标(R2)， $\Delta R=10$ km(R2)和 $\Delta R=15$ km(R2)，见图 1 (b)。融合中心一共得到 6 条航迹，雷达 1 的 3 条航迹，雷达 2 的 3 条航迹。由图 1(c)可知，实体目标(飞机本身)出于同源，航迹几乎重合在一起，仅受噪声影响；而假目标的航迹是在雷达干扰机连线上延迟得到的，并未同源，所以不能重合，直观感觉比较容易鉴别假目标。



(a) 雷达 1 观测航迹



(b) 雷达 2 观测航迹



(c) 融合中心观测航迹

图 1 同源检验的示意图

平均航迹关联距离如表 2 所示。由表可知，通过分布式组网，来自实体目标(真目标)间的航迹被关联上，关联距离较小；而其它目标间的航迹关联距离较大，导致假目标航迹被剔除。由此说明分布式组网具有天然的抗距离欺骗假目标能力。

表 2 平均航迹关联距离表 /m

目标类型	真目标 (R1)	$\Delta R=10\text{km}$ (R1)	$\Delta R=15\text{km}$ (R1)
真目标(R2)	117.21	6 780.07	8 293.03
$\Delta R=10\text{ km}$ (R2)	6 225.11	988.88	3 087.64
$\Delta R=1\text{km}$ (R2)	6 933.85	1 003.56	2 684.73

2.2 反隐身能力分析

突防方采用赋形设计、阻抗加载、涂覆吸波材料等隐身措施对单部雷达进行对抗,使单部雷达很难对目标进行连续观察和测量,只能得到一些无规律的间断点迹。如果采用不同频率的雷达从多个方向上照射隐身目标,并采用组网融合技术,就有

可能得到隐身目标完整、连续的航迹。

图 2 以某飞机模型 X 波段暗室测量数据为例,仿真得到了典型战情下 3 部雷达对目标的检测概率。由图可知,由于目标 RCS 严重依赖于雷达视线角,导致单部雷达在某些时间段的检测概率很低,因此在这些时间段极易失跟。而通过组网融合后(采取或原则),目标在整个时间段的检测概率都得到提高,理论上通过集中式组网得到的融合航迹数据率更高,持续时间更长,因而具备反隐身功效。实际上,组网雷达凭借其地域和体制优势,集多种反隐身措施于一身,具备较强的反隐身能力,是目前公认的隐身目标克星。

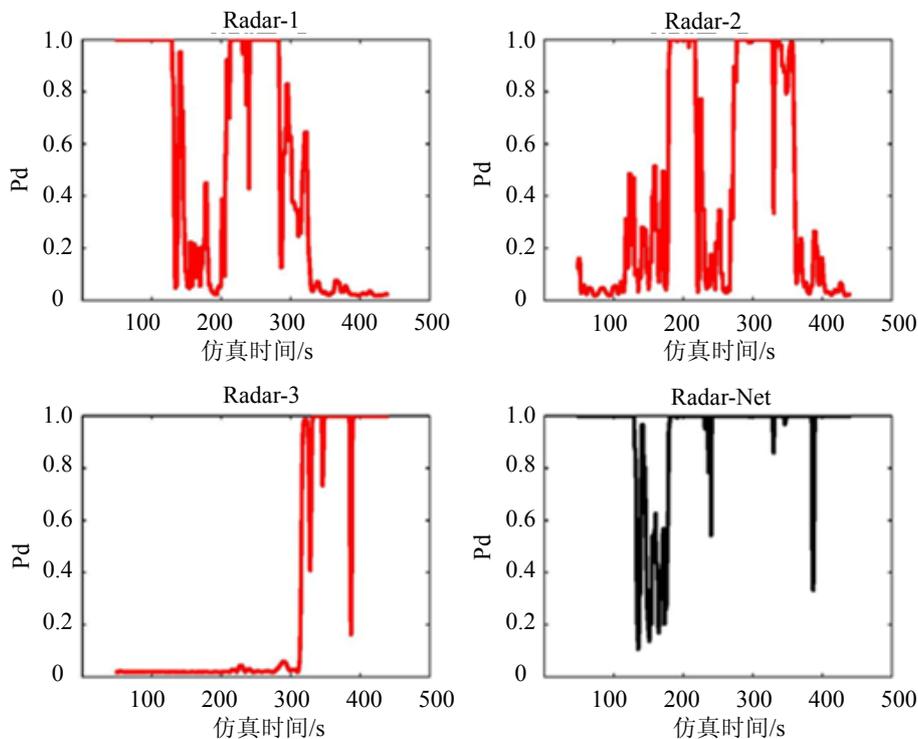


图 2 3 部雷达对目标的检测概率及融合检测概率

2.3 融合精度分析

分析雷达组网对融合精度的影响。以 2 条航迹融合为例,设 $\hat{X}_i^1(k|k)$ 和 $\hat{X}_j^2(k|k)$ 分别表示为雷达 1 对目标 i 和雷达 2 对目标 j 的状态估计值, $P_i^1(k|k)$ 和 $P_j^2(k|k)$ 分别为相应的协方差。忽略 2 条航迹估计的互协方差,即 $P_{ij}(k|k) = P_{ji}(k|k) \approx 0$, 则按照最大似然准则,最佳航迹融合算法由下式得^[7]:

融合状态

$$\hat{X}(k|k) = P(k|k)[P_i^1(k|k)^{-1}\hat{X}_i^1(k|k) + P_j^2(k|k)^{-1}\hat{X}_j^2(k|k)] \quad (1)$$

融合误差协方差

$$P(k|k) = [P_i^1(k|k)^{-1} + P_j^2(k|k)^{-1}]^{-1} \quad (2)$$

上面两式很容易推广到 N 部雷达情况。特别地,假设 N 部雷达的测量精度相当,则容易得到

$P(k|k) = P_i^1(k|k) / N$, 也即是说 N 部雷达组网后, 融合误差理论上减少为原来的 $1/\sqrt{N}$ 。这样, 2 部雷达组网融合误差减少为原来的 70.71%; 3 部雷达组网融合误差减少为原来的 57.54%; 即使 10 部雷达组网, 融合误差也仅减少为原来的 31.62%。由此可知, 组网雷达数目并不是越多越好, 对精度提高并不明显, 且会导致系统复杂性增加。一般采用两到三部雷达组网即可取得较好的效果。组网的最大优势还是在于反隐身和抗干扰等附加能力, 提高精度并不是唯一目的。

本文设计了大量仿真场景, 对不同布站条件、不同雷达数目、不同测量精度等场景进行仿真。图 3 是一个典型的三雷达融合结果(滤波算法采用 $\alpha\beta\gamma$ 滤波)。通过大量仿真, 有以下关于融合精度方面的结论: (1) 采取 3 部同种或相近体制雷达组网有助于提高融合精度; (2) 雷达尽量采取空间分集能提高融合精度; (3) 3 部雷达组网后平均距离误差减小到单部误差的 60%, 平均速度误差减小为单部误差的 30% 左右。(4) 精度差异太大的不同类型雷达组网融合精度提高不明显, 其融合精度接近于测量精度最高的那部雷达。(5) 3 部雷达组网比 2 部雷达组网能较大幅度提高融合精度。

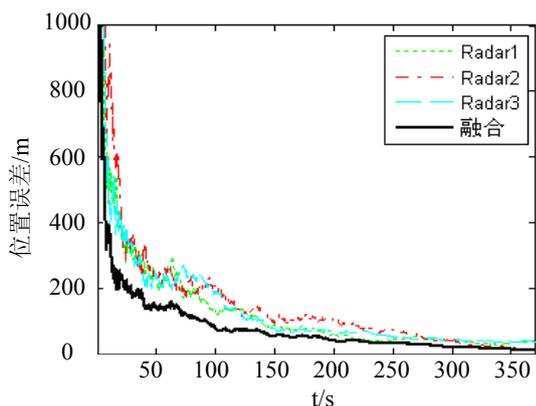


图 3 3 部雷达组网位置融合误差图

2.4 通信量分析

下面对分布式组网和集中式组网的通信量进行分析。为了减少流量, 采用编码方法, 利用最小 bit 位(LSB)^[8]进行分析。假设最大探测距离限定为

5000 km, 距离编码精度为 1 m; 最大速度限定为 7000 km/s, 速度编码精度为 0.1 m/s; 最大录取时间限定为 1 天, 时间编码精度为 1 ms; 角度最大值为 360°, 角度编码精度 0.001°。

2.4.1 分布式组网的通信量

传输数据主要为航迹信息: 滤波位置 (x, y, z) 、滤波速度 $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ 、时间戳、航迹号、滤波协方差(可只传协方差对角元素)等。当然可能还有一些其它附加的传输量, 这里暂不考虑。则分布式组网总的通信量约为

$$R_{\text{distributed}} = \frac{N_{\text{radar}} N_{\text{track}}}{I_{\text{track}}} (3n_{\text{pos}} + 3n_{\text{vel}} + n_{\text{time}} + n_{\text{track}} + n_{\text{cov}}) = \frac{3 \times 400}{0.1} (3 \times 24 + 3 \times 18 + 27 + 9 + 126) = 3.456 \text{ Mbits} \quad (3)$$

注意这里 $n_{\text{pos}} = 24 \text{ bits}$ 为单个滤波位置通信量, $n_{\text{vel}} = 18 \text{ bits}$ 为单个滤波速度通信量, $n_{\text{time}} = 27 \text{ bits}$ 为时间戳通信量, $n_{\text{track}} = 9 \text{ bits}$ 为航迹号通信量, $n_{\text{cov}} = 3n_{\text{pos}} + 3n_{\text{vel}} = 126 \text{ bits}$ 为 6 个协方差对角元素的通信量, $N_{\text{track}} = 400$ 为同时航迹数目, $I_{\text{track}} = 0.1$ 为平均数据间隔。

由此可见分布式融合的通信量是比较小的, 现有百兆或千兆以太网完全能够胜任。另外, 由上式可以看出, 对通信量影响较大的参数是: 滤波协方差、同时跟踪目标数目和单雷达跟踪数据率。这里我们是按最大跟踪目标数 400 个来算的, 实际系统的跟踪目标数一般小于该值, 另外单部雷达的数据率取为 10 Hz, 也比较符合一般的相控阵雷达跟踪数据率。即使数据率取为 100 Hz, 其通信量也仅为 34.56 Mbits, 也基本满足需要。

2.4.2 集中式组网的通信量

传输数据主要为点迹信息: 距离、方位、俯仰、时间戳、距离测量精度、方位测量精度和俯仰测量精度等。这里和分布式组网传递的数据有所区别, 数据包里面没有航迹号。

集中式组网总的通信量约为

$$R_{\text{central}} = \frac{N_{\text{radar}} N_{\text{meas/scan}}}{I_{\text{track}}} \times (n_{\text{range}} + n_{\text{bearing}} + n_{\text{elevation}} + n_{r_acc} + n_{b_acc} + n_{e_acc} + n_{\text{time}}) = \frac{3 \times 1000}{0.1} (24 + 19 + 19 + 9 + 13 + 13 + 27) = 3.72 \text{ Mbits} \quad (4)$$

注意这里 $n_{\text{range}} = 24 \text{ bits}$ 为距离测量值通信量, $n_{r_acc} = 9 \text{ bits}$ 为距离测量精度通信量, $n_{\text{bearing}} = 19 \text{ bits}$ 为方位测量值通信量, $n_{b_acc} = 13 \text{ bits}$ 为方位测量精度通信量, $n_{\text{elevation}} = 19 \text{ bits}$ 为俯仰测量值通信量, $n_{e_acc} = 13 \text{ bits}$ 为俯仰测量精度通信量, $n_{\text{time}} = 27 \text{ bits}$ 为时间戳通信量。

由上式可以看出,集中式组网的通信量主要由雷达数目,每次扫描时的量测数目和跟踪数据率决定。一般来说,集中式组网由于传递的是原始点迹,受环境影响较大,当存在箔条、电子干扰的情况时,通信量会较大程度增加。但总的来说,由于传递的只是窄带测轨信息,集中式组网的通信量是比较小的,现有百兆或千兆以太网完全能够胜任。

3 结论

本文介绍了集中式组网融合和分布式组网融合的基本原理,详细分析了雷达组网诸多方面的性能改善。总结两种雷达组网的特点,集中式雷达组

网的实质是多雷达探测信息的“并”,利用信息互补,具备航迹合成功效;分布式雷达组网的实质是多雷达探测信息的“交”,利用信息冗余,具备电假目标航迹鉴别功效。本文性能分析的研究结果可为新一代智能雷达组网数据融合系统的建设提供一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 陈永光,李修和,沈阳. 组网雷达作战能力分析 with 评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [2] 孙连山,杨晋辉. 导弹防御系统[M]. 北京: 航空工业出版社, 2004.
- [3] 赵艳丽,王雪松,王国玉,等. 多假目标欺骗干扰下组网雷达跟踪技术[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 454-458.
- [4] 郭冠斌,方青. 雷达组网技术的现状与发展[J]. 雷达科学与技术, 2005, 3(4): 193-197.
- [5] 赵志超,王雪松,刘义,等. 基于单部半实物雷达的分时组网仿真方法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(18): 5614-5617.
- [6] 赵志超,饶彬,王涛,等. 雷达网检测概率计算及性能评估[J]. 现代雷达, 2010, 32(7): 7-10.
- [7] 何友,王国宏,陆大金,等. 多传感器信息融合及应用[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [8] Bar-Shalom Y, Blair W D. Multitarget-Multisensor Tracking Applications and Advances Vol III [M]. Norwood, MA, USA: Artech House, 2000.
- [9] Schleher D C. Electronic Warfare in the Information Age [M]. Boston, MA, USA: Artech House, 2000.

(上接第 1525 页)

- [9] Yoon S E, Salomon B, Gayle R. Quick-VDR: out-of-core view-dependent rendering of gigantic models [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (S1077-2626), 2005, 11(4): 369-382.
- [10] 聂俊岚,刘硕,郭栋梁,等. GPU 加速的多分辨率几何图像快速绘制方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学

报, 2013, 25(1): 101-109.

- [11] Yao C Y, Lee T Y. Adaptive geometry image [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (S 1077-2626), 2008, 14(4):948-960.
- [12] Pajarola R. Large scale terrain visualization using the restricted quadtree triangulation [C]// Proceedings of Conference on Visualization. Los Alamitos, USA: IEEE Computer Society Press, 1998: 19-26.